

論文の内容の要旨

論文題目 超強磁場における半金属および低次元電子系の量子極限物性

氏名 井口 智明

本研究の目的は、100 T 以上の超強磁場中におかれた物質の電子状態を探索することである。超強磁場中におかれた半金属や低次元電子系は純粋な量子極限状態に入るため、多彩な量子現象を示すと考えられる。このような現象についての研究を行う上で電気伝導測定は必須である。しかし、100 T 以上の超強磁場は破壊的な方法を用いて単発かつ高速パルスの磁場として発生されるため、大きな誘導起電力やノイズ等の影響により、測定は極めて難しい。そこで、本研究では超強磁場中で使用できる電気伝導測定法の開発を行い、その測定法を用いて量子極限下にある半金属および低次元電子系の電子状態について研究を行った。その結果を以下に記す。

(1) 超強磁場における電気伝導測定法の開発

本研究では一巻きコイル法および電磁濃縮法を使用して超強磁場発生を行った。一巻きコイル法では、コンデンサーに蓄えられた電荷を銅製の 1 巻きコイルに直接放電することで約 10 μs の間に 200 T 以上の超強磁場を発生する。放電の際、コイルはマクスウェル応力を受けて破壊されるが、完全に破壊される前に放電を完了することで超強磁場発生を可能にしている。電磁濃縮法では、銅製のリングに初期磁場を注入しておき、リングを電磁力によって収縮させることで磁束を濃縮し超強磁場の発生を行う。この方法で約 50 μs の間に 300 T を超える磁場が発生されている。

以上のように 100 T 以上の超強磁場は数 10 μs の時間幅を持つパルスとして発生されるため、電気伝導測定を行う際には誘導起電力とノイズへの対策が必要となる。本研究では誘導起電力よりも高い周波数のバイアスおよび反射係数測定を用いた測定装置の開発を行い、超強磁場中での電気伝導測定に成功した。この測定法は磁場発生に伴う誘導起電力とノイズの影響を抑えることができるため、超強磁場中で有効な測定手段であり、今後量子極限での電子状態の解明に大きな発展をもたらすことが期待される。

(2) 超強磁場におけるグラファイトの電子状態の探索

グラファイトは、面方向には炭素原子の σ 結合および π 結合による強固なハニカム構造を形成し、積層方向には van der Waals 力で弱く結合した典型的な層状物質である。このハニカム構造のシート 1 層だけではゼロギャップ半導体であるが、積層方向のわずかなトランスファーによって半金属となる。このトランスファーの弱さを反映して、キャリア密度は絶対零度で 1 原子あたり 10^{-4} 個程度と、非常に少ない。そのため、積層方向に平行に磁

場を印加すると 7.3 T と比較的弱い磁場で $n = -1$, $n = 0$ と指数付けされた 2 つのサブバンドにのみキャリアが存在する擬量子極限状態に入る。この系の 60 T までの電子状態については詳細に研究されており [1-3], 28-53 T の領域で磁場誘起相転移を示すことが知られている [4]。この相転移は、磁場によって系が 1 次元化される結果生じる $2k_F$ 不安定性による密度波電子相転移として理解されている [5]。それ以上の磁場領域では、新たな $2k_F$ 不安定性が生じる可能性や電子間相互作用の増大など多彩な量子効果の発現が期待されているにもかかわらず、過去の実験例は極めて少ない。

そこで、本研究では前記の測定法を用いて、100 T を超える磁場までグラファイトの磁気抵抗測定を行った。その結果、新たに 63 T 付近に磁気抵抗の折れ曲がりを観測した。27.0 ~ 31.5 K と比較的高温で観測されたことから、この構造はおそらく電子相転移によるものではなく、Shubnikov de-Haas (SdH) 振動であろうと考えられる。なお、従来観測されている 28 ~ 53 T 付近の磁気抵抗異常は観測されなかったが、これは初期温度が高かったことに起因すると考えられる。また、63 T 以降 120 T までには顕著な磁気抵抗構造は観測されなかったことから、実験を行った温度範囲内では 63 T 以上の磁場領域での電子相転移はないものと考えられる。

この実験結果を解釈するために、電子状態を数値計算によって予測した。グラファイトのランダウ準位計算には、Slonczewski, Weiss, McClure らによって導出された SWM ハミルトニアンを用い、その値を用いて密度応答 χ_0 を計算した。その結果、70, 90, 130 T に SdH 振動が現れること、また、65, 106 T 付近では各サブバンドのネスティングベクトルが一致して密度応答関数の極大が生じ、新しい形の密度波相転移が起こる可能性があることがわかった。

しかしながら、以上の計算結果では実験結果を説明出来ない。これは、従来グラファイトの電子状態を説明するために用いられている SWM モデル、すなわち 1 体近似が強磁場になるにつれて成立しなくなることに起因すると考えられる。過去、高田らによる理論的研究により、サイクロトロン軌道半径が平均電子間隔以下になる超強磁場中では系が古典化し、電子相関効果が強調されるとの指摘がなされていた [6]。本測定はこの超強磁場における相関効果の増大を観測したのではないかと考えている。

(3) 超強磁場におけるビスマスの電子状態の探索

ビスマスは Jahn-Teller 効果によって面心立方格子からわずかにずれた正菱面体の結晶構造を持つ。電子および正孔の数は一般の金属に比べて極端に少なく、1 原子あたり 10^{-5} 個である。このため、比較的弱い磁場で量子極限状態にすることができる。また、強磁場を印加すると、電子と正孔のランダウ準位の交差が起き、半金属から半導体へと転移するという予想がなされている。比留間らは超強磁場下でビスマスの遠赤外透過率を測定したところ、88 T 付近に透過率の不連続な増加を見出し、半金属から半導体への転移であると解釈した [7]。

本研究では、電気伝導測定によるビスマスの超強磁場中での電子状態の解明を試みた。その結果、40 Tまでの磁場領域での測定結果は従来の電気伝導測定の結果と一致するものの、半金属-半導体転移に対応する磁気抵抗の増加は観測されなかった。この結果と遠赤外透過率測定の結果との相違の原因として、試料のキャリア数の違い、磁場発生方法の違いなどが考えられるが、本質的な原因についてはわかっていない。

(4) 超強磁場における2次元電子系の電子状態の探索

磁場中におかれた2次元電子系のエネルギー分散は δ 関数的なランダウ準位に量子化される。各ランダウ準位は不純物ポテンシャルの影響を受けて有限の幅をもち、中心部分を除いて波動関数は空間的に局在する。フェルミ準位がそのような局在状態にあるとき、ホール伝導率 σ_{xy} が $-e^2/h$ の整数倍に量子化される、整数量子ホール効果と呼ばれる現象が観測されている。さらに強い磁場中におかれた2次元電子系では、系のすべてのキャリアが最低ランダウ準位に分布する。すると、キャリア間の運動エネルギーの競合が無くなるため、電子間相互作用によってのみ系の電子状態が決まる。このような条件下で、 σ_{xy} が $-e^2/h$ の非整数倍に量子化される、分数量子ホール効果と呼ばれる現象が観測されている。このように50 T付近までの電子状態は精力的に研究されている。それ以上の磁場領域ではWigner結晶状態もしくはホール絶縁体などの電子状態が発現する等の理論的な予想がなされているものの、実験例はほとんど無く、特に電気伝導測定は皆無である。そこで、本研究では超強磁場中で2次元電子系の電気伝導測定を行う実験方法を開発し、その手法を用いて100 Tまでの測定を行った。

超強磁場中で2次元電子系の電気伝導測定を行う際には、試料のインピーダンスの高さが問題となる。標準的なホールバー構造の縦抵抗 R_{xx} は $20 \text{ k}\Omega \sim \infty \text{ }\Omega$ の範囲で変化し、ホール抵抗 R_{xy} は $20 \text{ k}\Omega$ 以上の値をもつ。このインピーダンスを反射係数法で測定する場合、0.5%以下の反射率の変化を測定しなければならず、実験精度から考えて測定はほぼ不可能である。そこで、本研究では、Corbino構造の縦伝導率の逆数 R が、

$$R = \ln(r_2/r_1) / (2\pi\sigma_{xx})$$

で表されることから、 r_2/r_1 を限りなく1に近づけ、また周長を長くすることでインピーダンスを下げる手法を用いた。ここで、 r_1 および r_2 はそれぞれ内側電極と外側電極の半径である。しかし、量子ホール効果を観測できるだけのチャネル幅を確保しながら周長を長くすると、磁場に対する試料の断面積が大きくなることに伴って誘導起電力が増大し、量子ホール効果のブレイクダウンが起きる恐れがある。そこで、小さな面積に折り畳まれたCorbino構造を考案し、誘導起電力の問題を解決した。

また、2次元電子系ではSdH振動が顕著に現れるため、パルス超強磁場中で電気伝導測定を行う際には磁気抵抗信号の高速な変化を観測しなければならない。そこで、新たに50 MHzの変化まで測定可能な反射係数法を用いたインピーダンス測定装置を構築した。

以上の電極構造と測定装置を用いて、GaAs/AlGaAsヘテロ界面に形成された2次元電子系について、初期温度4.2 Kで100 Tまでの電気伝導測定を行った。なお、この試料の4.2 Kでの移動度は $2.4 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ である。その結果、25 T ($\nu=1$) 付近および80 T ($\nu=1/3$) 付近に、それぞれ整数量子ホール効果および分数量子ホール効果に対応すると考えられる磁気抵抗の構造を観測した。この結果により分数量子ホール状態のギャップが

$$\Delta(\nu) = \frac{C}{2n+1} \frac{e^2}{\epsilon l}$$

で与えられるとするHalperinらの理論[8]が超強磁場下においても適用可能であるという知見を得た。なお、100 Tまでの磁場領域で2次元電子系の電気伝導測定を行った例は本研究が初めてであり、今後超強磁場領域での電子状態の解明に大きな発展をもたらすことが期待される。

- [1] S. Tanuma, R. Inada, A. Furukawa, O. Takahashi, Y. Iye, and Y. Onuki, *Physics in High Magnetic Fields*, Vol.24, Springer Series in Solid State Science, ed. By S. Chikazumi and N. Miura (Springer, Berlin, 1981) p.316.
- [2] Y. Iye, L. E. McNeil, and G. Dresselhaus, *Phys. Rev. B* **30** (1984) 7009.
- [3] G. Timp, P. D. Dresselhaus, T. C. Chieu, G. Dresselhaus, and Y. Iye, *Phys. Rev. B* **28** (1983) 7393.
- [4] H. Yaguchi and J. Singleton, *Phys. Rev. Lett.*, **81** (1998) 5193.
- [5] D. Yoshioka and H. Fukuyama, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **50** (1981) 725.
- [6] Y. Takada and H. Goto, *J. Phys. : Cond.Matt*, **10** (1998) 11315.
- [7] N. Miura, K. Hiruma, G. Kido, and S. Chikazumi, *Phys. Rev. Lett.* **49** (1982) 1339
- [8] B. I. Halperin *et. al.*, *Phys. Rev. B* **47** (1993) 7312.